“天关”背后的科学故事：“龙虾眼”诞生记

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/31189.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

“天关”背后的科学故事：“龙虾眼”诞生记
。近期，“天关”卫星首批科学成果正式发布。自2024年1月9日发射以来，它探测到多种类型的暂现天体，并捕捉到几例可能的新类型暂现源。其卓越的X射线探测能力得益于核心载荷——宽视场X射线望远镜（WXT，中文名为万星瞳），也被称为“龙虾眼”。

回顾其研发历程，来自中国科学院国家天文台（以下简称国家天文台）、北方夜视公司及中国科学院上海技术物理研究所（以下简称上海技物所）的科研团队通力合作，从头设计和研制“龙虾眼”X射线聚焦镜、CMOS探测器阵列、前端电子学、磁屏蔽、热控和支撑结构等组部件构成，将工匠精神贯穿始终。

科研团队为之感到自豪：“国际上至今没有能与‘龙虾眼’媲美的载荷甚至样机，我们在技术上一步跨越了近30年！”

“试试就试试”

恒星爆炸、中子星合并、黑洞吞噬恒星……一系列天文事件总在瞬间发生，伴随着海量能量释放，大量X射线光子向四面八方奔腾而去。想要了解这些天文事件，用一台能看到极其广阔宇宙空间的望远镜去捕捉、观察X射线不失为一个好办法。

2000年以来，专门研究宇宙中变化天体的“时域天文学”逐渐成为国际天文学界的前沿领域，利用模仿“龙虾眼”结构来设计观察X射线的望远镜被公认为推动这一领域的先进工具。这个技术最初的想法源自美国天文学家罗杰·安吉尔1979年发表的一篇论文。

2010年夏天，刚从清华大学完成博士后工作的张臣即将入职国家天文台。他正打算放个暑假，就接到中国科学院高能物理研究所研究员张双南的电话。

“‘龙虾眼’可能是个突破点，要不你来试试？”张双南开门见山。“试试就试试！”张臣深知“龙虾眼”的“威力”，毫不迟疑答应了。

就这样，张臣入了“龙虾眼”的坑，担任当时刚刚提出来的空间站X射线全天监视器的技术负责人。当时“龙虾眼”还没有在空间项目中成功应用的先例，张臣深知，自己面对的是一道世界难题，也是一个向科技制高点发起冲锋的好机会。

自主攻克致命问题

镜片是“龙虾眼”望远镜的关键部件之一，制备难度高。当时，世界上仅有一家法国的公司有能力生产出这样的镜片。科研团队最初计划从这家公司购买。“公司卖每片20万，我们计划购买400多片，不降价也不保证质量。”2010年前后，张臣三次前往法国布里夫访问这家公司，都空手而归。

科研团队只好一边埋头论证科学目标和技术可行性、钻研相关实验设备，一边反复与这家公司沟通，尝试购买20片镜片。

经过漫长的等待，他们终于拿到产品，检测后却发现只有10片可以用，另外10片质量极差，几乎无法使用。这种情况持续到2014年“天关”卫星进入到背景型号研究。

“没有最关键的X射线成像器件，对一个空间望远镜项目而言，是一个致命的问题。”张臣说。

所幸，在希望最渺茫的时候，团队中也没有人放弃。2015年，在“天关”卫星背景型号研究后期，机会终究是垂青了有准备的人。国内一家生产相近产品的企业——北方夜视公司主动请缨，承担“龙虾眼”光学器件自主研制的任务。

从此，“龙虾眼”的自主研制进入快车道。在张臣的记忆里，那是一段为了梦想而忘我奋斗的难忘时光。“一开始镜片性能很差，连聚焦的‘十字形’都看不清，科研团队投入了全部精力，实现了快速迭代。”他回忆。

北方夜视公司不计成本，分批生产了2万余片“龙虾眼”镜片，进行批量化筛选，完成了正样所需的400余片镜片的筛选。再由人工复核，最终实现所有正样镜片参数零错误。

研发过程始终受到来自科学目标需求的强大牵引。镜片最初的设计中，有一个指标难以达到最终的探测要求。对此，团队认为这会影响科学产出的质量。于是，他们选择了面对新的挑战，于是仪器团队重新进行了设计并做了大量技术改进，又耗费了相当长的一段时间，最终达到了预期效果。

对于代表分辨率的指标“角分”，团队一个角分一个角分“死磕”，从最初的10个角分提升到5个角分以下。最终，这一指标达到4~5角分，最佳达到3角分，处于国际领先水平。

没有先例的超前决定

团队遇到的另一个挑战是光子探测器的研制。20世纪90年代以来，X射线望远镜一般采用电荷耦合器件（CCD）作为焦面探测器。但国内目前尚无法制造满足天文需求的科学级CCD，进口的价格十分昂贵。此外，以往常用的气体探测器，可能会因为太空中的微流星和宇宙尘埃撞击而失效。

国际空间站“X射线全天监视器（MAXI）负责人松冈博士也一针见血地提出了这个意见。

经过大量实验验证后，团队创新性地将背照式互补金属氧化物半导体（CMOS）应用于探测X射线光子。尽管CMOS早已广泛应用于数码相机、手机摄像头，但这是国际上首次将CMOS探测器应用于空间X射线天文探测。

“我们使用的CMOS探测器具高性能、高灵敏度、高一致性的特点，且每个探测器面积达6cm×6

cm。”国家天文台研究员、“天关”卫星载荷科学家凌志兴指出，“这也是一个重要创新，目前还没有其他项目使用过这么大规模的硅基成像探测器。

谁也没有想到的是，当卫星正样出厂的前夕，CMOS却出现了“险情”。为保证技术可靠性，2022年7月，科研团队利用一次搭载机会，开展了“龙虾眼X射线成像仪”（LEIA）试验，由“力箭一号”发射升空。LEIA在轨验证了龙虾眼成像技术和探测器技术，取得了成功。

但在工作了一段时间后，坏消息传来：在轨试验的CMOS出现了异常条纹。“当时把大家都吓坏了，这个问题要不解决我们就不敢出厂了！”“天关”卫星工程副总指挥、国家空间科学中心研究员孟新告诉《中国科学报》。

对于工程总体而言，卫星立项批复、方案转初样、初样转正样、出厂、发射以及在轨测试完成评审等都是项目管理中重要的关键时间节点，每一个节点都要严格按照计划推进。为此，国家空间科学中心组织几家共同分析，在尽可能短的时间里，把能想到的实验都做了。

孟新看到，那段时间里，整个团队神经高度紧绷，许多人的眼睛都是红的。“大家都是带着高度的责任感，铆足了劲在干。”他说，“一旦耽误了出厂，发射可能就遥遥无期了。”

所幸，通过缜密的试验，他们基本得出了结论：这是一个由局部缺陷引发的个别案例，而非批量生产的问题。

面对巨大压力，“天关”卫星工程总师、中国科学院院士顾逸东对这次“险情”拍了板，决定按计划继续向前推进，他相信这一事故不会影响整体任务的成功。

互补，但不越位

2017年，当“天关”卫星准备工程立项时，袁为民在一次项目会议上向上海技物所研究员、中国科学院院士孙胜利发出邀请，希望他承担万星瞳载荷总体和部分关键技术的攻关。孙胜利带领的科研团队在天文卫星科学载荷研制方面有着丰富的工程经验。

孙胜利介绍，“龙虾眼”要实现X射线聚焦的特点带来了全方位挑战，包括标定数据处理、结构温度保持以及在轨安全性和可靠性等方面。“项目立项之初，我们梳理了6类的关键技术，包括上百个问题需要解决。”他表示。例如，针对X射线聚焦的测试，孙胜利带领的科研团队率先提出基于数字孪生的新方法，实现了像元的全覆盖。

上海技物所副研究员、万星瞳载荷主任设计师孙小进介绍，典型的龙虾眼MPO镜片是一个42.5mm×42.5mm的曲面，曲率半径为750mm，每个镜片上有近100万个小方格，方格的大小为40μm×40μm，壁的厚度为8μm，光洁度达到0.83nm，这对整个相机关键元部件获取和系统集成装调提出了十分苛刻的要求。

孙小进仍然记得“龙虾眼”的一次关键考试。2021年6月，初样阶段研制的第一个子模块在百米束线定标下，监视软件上输出了清晰的“十字形”图像。“‘龙虾眼’首光测试成功让测试大厅里上海技物所和国家天文台的项目组成员都喜出望外。”孙小进表示。

在“龙虾眼”的研制中，三家单位的科研团队各自发挥优势，通力合作，共同攻克了一个又一个技术难题，成功完成全部国产化的自主研制。其中，国家天文台负责设备的科学性，提供光学设

计、镜片参数的 X 射线测试并对镜片质量改进路线的科学建议，以及龙虾眼聚焦镜组件的自动化装调、测试和标定；北方夜视公司负责镜片实际加工和工艺改进；上海技物所则负责工程实现，组装整个载荷仪器，逐一攻克了结构热控、横向阵列、CMOS探测器复杂结构、精密热控及电子学等关键技术。国家天文台和上海技物所还负责完成完整的万星瞳望远镜模块地面X射线标定。

张臣用“ 犬牙交错 ”来形容这些工作相互融合、多线并行的程度。他感到，大家都是怀着赤诚之心，想把这件事做好。“ 遇到问题时，互相帮忙，共同努力解决问题，而不是把责任推给对方，团结协作的精神是确保项目成功的关键。 ”张臣说。

在孙胜利看来，这次合作就像一支足球队踢了一场好球，每个人都有自己明确的位置，队员们互相配合、互补，是一种动态的合作，并且没有越位。“ 这是建制化地开展科学卫星研制的良好范本。 ”孙胜利强调。

作者：甘晓 来源：中国科学报

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发